

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21964

研究課題名（和文）アークフリーのkA級直流遮断を実現する異種金属接合型マイクロドット接点開発

研究課題名（英文）Micro dot electrodes with dissimilar metals for arc-free kA DC current interruption

研究代表者

安岡 康一（Yasuoka, Koichi）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00272675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：機械接点と半導体を組み合わせたハイブリッド直流遮断器において、kA級の直流アークフリー遮断を目指した。アークは接点金属の沸騰により発生する。このため、タングステン材料の使用、銅裏打ち接点による熱放散の促進、接点分割による電流の分散を提案した。高沸騰温度のタングステンを銅基材上に配置した接点構成をシミュレーションで評価した結果、無分割のタングステン接点でのアークフリー転流は450Aであるが、4分割では800Aに増加した。しかし実験結果では分割によらず限界値は400Aに留まったため、新たに銅・銅炭素・炭素を用いた可変抵抗接点を開発し、アークフリー電流の増加が見込める構成であることを見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CO₂を排出しない再生可能エネルギーの大量導入にむけて、蓄電装置を含めたkA級の直流システムの構築が急務である。ただし直流は交流と異なり電流ゼロ点がないため、機械接点ではアーク継続や電磁ノイズ発生が課題であり、これに替わって半導体パワーデバイスが利用される。ただし半導体デバイスは定常時の電力損失が大きい欠点がある。これらの課題を解決する手段として機械接点と半導体を組み合わせたハイブリッド直流遮断器が提案されているが、現状では短時間アーク発生が課題が残る。本研究は新たな接点構造によりアークフリーの直流ハイブリッド遮断器を研究するもので、社会要請に合致している。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to realize a kA-class arc-free technology in a hybrid DC circuit breaker that consisted of mechanical contacts and semiconductor devices. Since the arc is generated when the temperature of the contact surface exceeds a boiling temperature, we proposed mounting of tungsten material, enhancing of heat dissipation using copper-based tungsten contacts, and 4-block structure to disperse the contact current.

Numerical simulation showed that the arc-free current was 450A for the copper-based tungsten contacts, but was increased to 800 A for the 4-block-structure contacts of copper-based tungsten. The arc free current in experiments was limited to 400 A regardless of the division number. Thus, a variable resistance contacts was newly developed using copper, copper-carbon, and carbon materials. In conclusion, this configuration is expected to increase the arc-free current.

研究分野：高電圧プラズマ工学

キーワード：電気接点 溶融ブリッジ アーク 高融点材料 可変抵抗

1. 研究開始当初の背景

直流電流を機械接点で開閉するとアークが接点間に継続して、1回の電流遮断でも接点は大きく損耗する。このためアークを消弧する種々の技術が開発されてきた。実用化された kA 以上の直流遮断器としては、真空遮断器と転流用のコンデンサバンクを一体化した大型の電鉄用直流遮断器がある。また kV 以下の小電流用途では半導体パワーデバイスのみで構成した直流遮断器がある。半導体式は高速しゃ断が可能な反面、定常時損失が大きい大型の放熱機構を必要とする課題がある。これに対して機械接点とパワーデバイスを並列接続したハイブリッド直流遮断器は定常時損失が小さいことに加え、パワーデバイスで直流電流を遮断するため、機械接点間に発生するアーク時間が ms 未満と短い特徴がある。ただし短時間アークによって電磁ノイズが発生し、かつ機械接点が損耗する課題は残っており、特に kA 級のアークフリー遮断は実現されていない。なおハイブリッド直流遮断器は 100 kV 超の超高压直流送電システム用にも開発されているが、本研究の対象外である。

2. 研究の目的

直流マイクログリッドは太陽光や風力などの再生可能エネルギーと蓄電池システム等を有機的に連携することで高効率運用が可能である。近年本格導入が図られているが、鍵となる技術のひとつに、直流電流の遮断あるいは開閉技術がある。本研究は kV-kA 級のハイブリッド直流遮断器において、アークフリー遮断を実現する接点構成の開発を目的とする。

3. 研究の方法

ハイブリッド直流遮断器の構成を図 1 に示す。機械接点と半導体パワーデバイス、それにサージ電圧制限用バリスタが並列接続される。定常時の直流電流は機械接点を流れ、遮断時には機械接点から半導体パワーデバイスに転流されて遮断される。接点間に発生するアーク電圧は瞬時に 10 V 以上になり、パワーデバイスのターンオン電圧よりも十分大きい。このため転流は加速され、アークは消弧して機械接点電流はゼロになる。パワーデバイスのターンオフ時には、図示していない回路インダクタンスによってパワーデバイス両端にサージ電圧が発生する。サージ電圧は並列接続したバリスタのクランプ電圧により制限される。回路電流はその後バリスタを流れるが、バリスタの抵抗でエネルギーが消費されて回路電流はゼロになり、この時点で遮断は完了する。なおパワーデバイスをターンオフする時刻は、接点間の絶縁破壊電圧がサージ電圧以上になった時点で、数 ms 以内である。

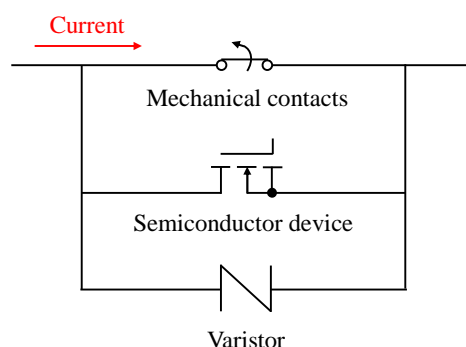


図 1 ハイブリッド直流遮断器の構成

本研究では、接点間のアーク発生を抑制する「アークフリー転流」の実現を目標とした。接点は通常数 10N の圧力で閉じられ、接触抵抗を低減させて使用される。銅の接点抵抗は mΩ 以下であるが、開極時は圧力低下により接触面積が減少して接点抵抗は増加し、接点電圧も増加する。通電状態での接点電圧 V_c と接点表面の最高点温度 T_{max} は Holm[1] の式で与えられ、両者は比例関係にある。アークは接点材料が沸騰した時点で発生するが、この時の沸騰電圧は銅で 0.8 V、タングステンで 2.1 V である。よって開極時の接点電圧を沸騰電圧以下に抑えればアークフリー転流が実現できる。[2] 接点電圧は接点電流の低下とともに低下するため、転流を加速するパワーデバイスの選択が有効である。ここではターンオン時の閾値がなく、オン電圧の低い SiC-MOSFET モジュール (Wolfspeed, CAS325M12HM2, 1200 V, 444 A, 3.7mΩ) を使用した。またバリスタは、電圧 390 V、クランプ電圧 650 V の素子 (Panasonic, ERZV20D391) を並列接続して使用した。

接点は、円柱状の無酸素銅端基材上に 1mm 厚のタングステンをロウ付けした構成で、タングステン部が接点表面として接触する。開極時には電流が集中して接点温度が増加するため、銅基材によってタングステンから熱を放散させて、接点温度が沸騰温度を超えない状態に保つことが狙いである。本研究では図 2 に示すように、タングステンを 4 分割した接点、および、2 分割、分割なし接点を製作し比較した。図 3 は転流実験回路を示す。転流評価では直流電流を遮断しない回路にして、遮断による接点表面の損耗を防止した。また、接点電流や電極部の温度分布は COMSOL Multiphysics® 5.4 による回路連成シミュレーションにより計算し、接点分割の効果を評価した。

[1] R. Holm, “Electric Contacts: Theory and Application,” 4th edit., Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1967.

[2] K. Yasuoka, Y. Tsuboi, T. Hayakawa, N. Takeuchi, “Arcless Commutation of a Hybrid DC Breaker by Contact Voltage of Molten Metal Bridge,” IEEE Trans. CPMT, Vol. 3, pp. 350–355, 2018.

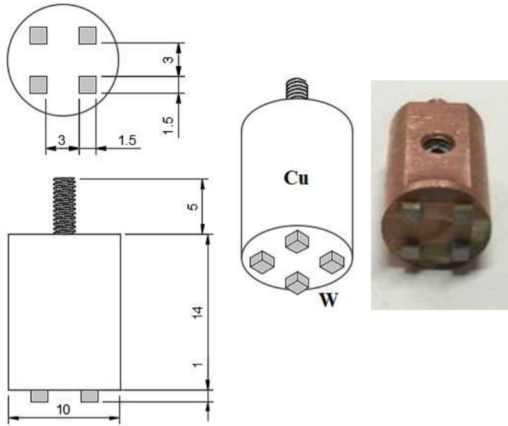


図2 4分割タングステンクラッド銅接点

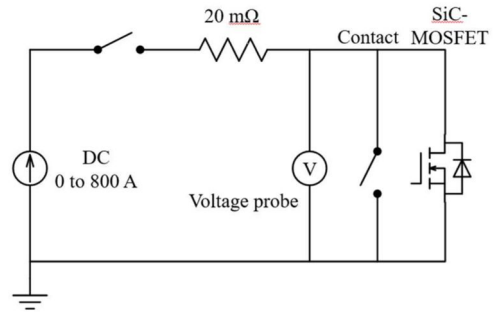


図3 ハイブリッド遮断器の転流実験回路

4. 研究成果

図4は450 A通電時の接点表面温度分布をシミュレーションで求めた結果である。上から順に、通電面積0.027 mm²の全面タングステンで、4分割接点のうちの2ブロック通電で通電面積2倍、4ブロック通電で通電面積4倍の結果を示す。接触点が複数存在すると温度低減効果は顕著である。4分割接点が機能した場合にタングステンの沸騰温度となる電流値は800 Aと見積もれた。

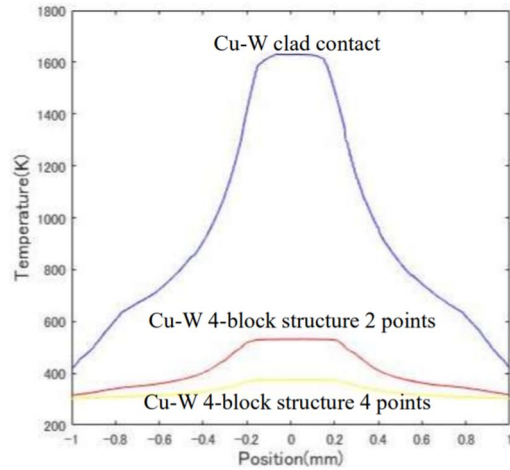


図4 接点分割数(1, 2, 4)と接点表面温度分布

図2に示した電極により実際に転流実験をした結果、400 Aまではアークフリーであるが400 Aを超えると転流終了時に10 Vを超えるサージ電圧と発光が観測され、短時間アークが発生したことが分かった。400Aという値は非分割タングステンクラッド接点のアークフリー限界値[3]であることから、4分割接点を均等に開極することの困難さを示している。

こうした開極制御の困難性を避ける方法として、開極時の接点抵抗を徐々に増加させて転流を進める可変抵抗接点を新たに提案した。接点を銅、銅炭素、炭素の3種の材料から構成したもので、図5に3層スライド接点の外観を示す。図6は転流時の電流電圧波形で、電圧が段階的に増加していることから転流制御が行われていることを示している。なお可変抵抗接点によるアークフリー限界電流の増加確認には至らなかったが、接点材料の溶融電圧による制限を受けない接点構造として利用可能であると結論付けた。

[3] 山田雄太, 陳黙, 安岡康一, “400A級ハイブリッド直流スイッチのアークレス開閉を実現するCu-W接点の開発,” 電気学会論文誌 B, Vol. 139, pp. 592-597, 2019.

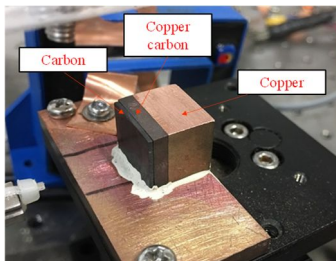


図5 3層スライド接点

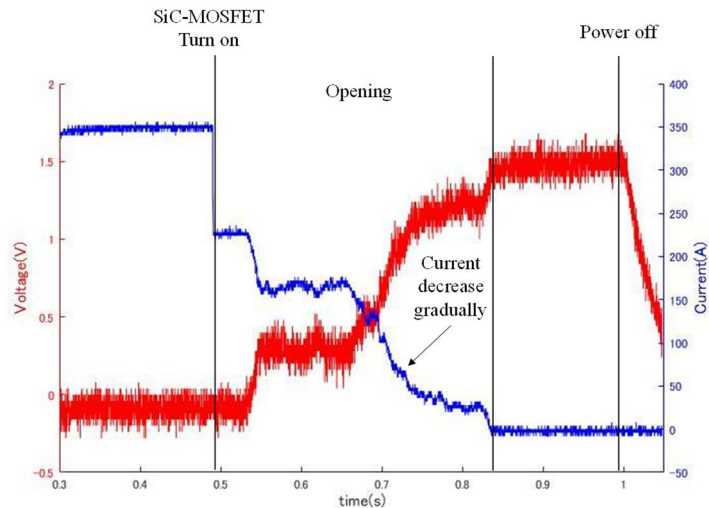


図6 3層スライド接点による転流時の電圧電流波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Huang, C. Ou, and K. Yasuoka
2. 発表標題 Hybrid DC switch with a Four-block Copper-Based Tungsten Contact
3. 学会等名 30th International Conference on Electrical Contacts(ICEC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学工学院竹内研究室ホームページ http://www.plasma.ee.titech.ac.jp/research/detail_189.html

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------